



Járműkarosszéria-lemezek alakítási tulajdonságainak vizsgálata

Examination of the Forming Properties of Vehicle Body Panels

Borbély Richárd,¹ Kölös Martin László,¹ Béres Gábor József¹

Neumann János Egyetem, GAMF, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország,
borbely.richard@nje.hu

Abstract

During vehicle design, the mass of the components and their resistance to collision are important criteria, as they affect fuel consumption and make the vehicle safer. In this study, we examined the deformation of high-strength materials commonly used in the automotive industry in the form of tailored welded blanks. Tests were conducted both in an experimental environment and in a simulation environment, measuring the punch displacement associated with the specimens to characterize the deformation. In designing the specimens, the weld seam was placed perpendicular and parallel to the rolling direction, thus creating different deformation states.

Keywords: *forming limit diagram, sheet metal forming, tailor welded blanks.*

Összefoglalás

A járművek tervezése során az alkatrészek tömege és az ütközéssel szembeni ellenállása fontos kritériumok, befolyásolják az üzemanyag-fogyasztást és biztonságosabbá teszik a járművet. Jelen tanulmányban az autóiparban gyakran előforduló, növelt szilárdságú anyagok alakváltozását vizsgáltuk méretre vágott hegesztett lemezek formájában. A teszteket kísérleti környezetben és szimulációs környezetben egyaránt elvégeztük, mérve a próbadarabokhoz tartozó bélyegelmozdulást, ezáltal jellemezve az alakváltozást. A mintadarabok kialakításánál a varratot hengerlési irányra merőlegesen és azzal párhuzamosan helyeztük el, ezáltal különböző alakváltozási állapotokat teremtve.

Kulcsszavak: *alakítási határdiagram, lemezalakítás, méretre szabott hegesztett lemezek.*

1. Bevezetés

A járművek tervezése során a tömeg mint kritérium fontos szerepet játszik, csökkentésével javítani lehet a járművek üzemanyag-fogyasztását. Az üzemanyag-fogyasztás csökkentése nem csak gazdaságilag teszi hatékonyabbá a járművek üzemeltetését, ugyanis az egyre szigorúbb károsanyag-kibocsátási normák teljesítését is elősegíti. Fontos megjegyezni, hogy a károsanyag-kibocsátási követelmények mellett számos – legalább olyan fontos – egyéb követelményt is szem előtt kell tartani a járművek tervezése során, mint például a járműkarosszéria ütközéssel szembeni

ellenállása, amit legfőképpen az anyag szilárdsága biztosít. Az iparban általánosan három különböző módszer terjedt el a tömeg csökkentésére. Az első a nagy szilárdságú, könnyű, ún. HSS (High Strength Steel) anyagok, amelynek egy csoportja a kettős fázisú acélok használata. Ezek az anyagok speciális mikroszerkezetüknek köszönhetően kiváló szilárdsági tulajdonságokkal jellemezhetők, ezzel lehetővé téve, hogy adott alkalmazási területen kisebb lemezzvastagságú anyaggal is biztosítani tudjuk az elvárt szilárdságot. Egy másik lehetőség, amely napjainkban egyre elterjedtebb, az optimalizálási módszerek alkalmazása a szerkezeti felépítésben. Ilyenek például az anyaghasz-

nálat vagy geometria optimalizálása terheléssel eloszlás alapján.

A harmadik lehetőség az olyan gyártástechnológiai eljárások, mint pl. a méretre szabott, hegesztett lemezek (angolul: tailor welded blanks) és különböző megalakítási eljárások alkalmazása. Az ilyen módszerek közül a méretre szabott, hegesztett lemezek jelentős potenciált kínálnak a járműbiztonság javítására és a tömeg csökkentésére, ami a gyártási költségeket is csökkentheti a kisebb szerszámozási költség vagy a gyártási idő csökkenése révén. A méretre vágott, hegesztett lemezterítékek egyes részei a beépítési hely céljától függően megfelelő méretűek, vastagságúak és anyagminőségűek [1, 2]. Továbbá alkalmazásuk az alkatrészek méretpontosságán is képes javítani azáltal, hogy az alkatrészek szerelése során ki tudja váltani a kötési eljárásokat. Ebben a tanulmányban a különböző tulajdonságú terítékrészek egymásra hatását elemeztük az alakíthatóságra vonatkozóan, végelelemes módszerrel az AutoFormR7 szimulációs szoftver segítségével [3, 4].

2. Felhasznált anyagok

A méretre szabott lemezek gyártásához szükséges anyagok kiválasztásánál az autóiparban gyakorta előforduló hagyományos és növelt szilárdságú acélokra esett a választás.

2.1. Kis szénttartalmú acélok

A hagyományos, kis szénttartalmú acélok közül a HC340LA hidegen hengerelt alapanyagot választottam ki. A kis szénttartalom lehetővé teszi a könnyű megmunkálhatóságot, alakíthatóságot, továbbá könnyen hegeszthető. A hideghengerlésnek köszönhetően pedig jó felületi minőség, alak- és méretpontosság jellemzi. Az ilyen anyag főként olyan célokra alkalmas, ahol a megmunkálhatóság nagyobb jelentőséggel bír, mint a kész alkatrész teherviselő képessége vagy szilárdsága.

2.2. Növelt szilárdságú acélok

A kettős fázisú acélok második generációs, növelt szilárdságú acélok, melyeket többnyire az autóiparban alkalmaznak. Az ilyen típusú acélokban a lágy ferrit és a kemény martenzit alkotóelemek kombinációja biztosítja a nagy szilárdságot és jó alakíthatóságot. Az anyag jellemzői a ferrit/martenzit szövataránytól és a martenzitszigetek eloszlásától függenek. A kettős fázisú acélok kiemelkedő szakítószilárdsággal bírnak, de nincs kifejezett folyáshatáruk. A martenzit általában 5–30%-ban van jelen a szövetszerkezetben, de kiemelten nagy szakítószilárdságú anyagoknál

akár 40%-ot is elérhet. Ezek az anyagok lehetővé teszik a gépjárművek ütközésekor bekövetkező károsodás csökkentését, anélkül, hogy a jármű tömegét jelentősen növelnék. A mintadaraboknál minden esetben a HC340LA anyaghoz került a HCT600X, illetve a HCT980X anyag külön-külön hozzá hegesztésre.

3. Méretre szabott, hegesztett lemezek

A vizsgálatok elvégzéséhez előzetesen előállításra kerültek a mintadarabok, amelyek később a valóságban végzett mérésekhez szükségesek. A méretre szabott, hegesztett lemezek különböző tulajdonságú, méretre vágott lemezek, melyeket valamilyen hegesztési eljárással kapcsolnak össze. E lemezek esetében a hegesztési varrat jelenlétéből adódik. Több tanulmány is foglalkozott már a hegesztési varrat és környezetének vizsgálatával, különböző alakítási eljárások hatásának feltérképezése érdekében [5, 6].

A lemezterítékeket esetünkben lézeres hegesztéssel kapcsoltuk össze. A hegesztést hozaganyag nélkül végeztük, és a varrat védelme érdekében 4.6 tisztaságú Ar védőgázt (18 liter/perc áramlási sebességgel) alkalmaztunk, de csak a koronaoldalon biztosítottuk a gázvédelmet. A gázhozzávezetést külső fűvóka biztosította. A lézeres hegesztésnél a lézernyaláb alakját és teljesítményét számos paraméter befolyásolja, melyek részletes leírása az MSZ EN ISO 11145 szabványban található [7].

A hegesztés paramétereit korábbi tapasztalatainkra alapozva választottuk meg, amelyeket az 1. táblázat mutat [8]. A cikknek nem célja a hegesztés minőségét tárgyalni, a hegesztés csupán azt a funkciót szolgálta, hogy szilárd kötést alakítsunk ki a két lemezanyag között. Továbbá a numerikus elemzés során a hegesztés paramétereit nem relevánsak, ugyanis a szoftver a kötéstechológiát a valóságtól eltérően értelmezi.

4. Numerikus elemzés

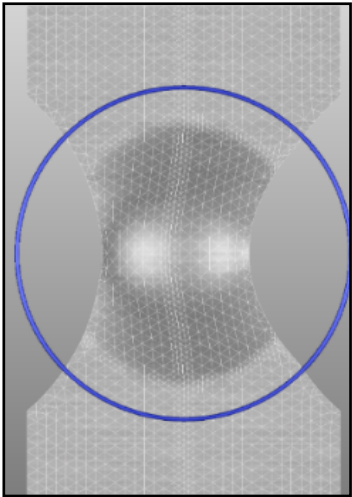
A szimulációkat az AutoFormR7 végelelemes szoftver segítségével végeztük el, amely egyike a legmodernebb szoftvereknek a lemezalakítás területén.

4.1. Szerszámelrendezés

A szimulációs környezet felépítése során a bemenő adatokat a valóságnak megfelelő értékek alapján vittük be a szoftverbe. Ezek alapján a szerszámok méretének és helyzetének meghatározásánál Erichsen 142-40 típusú, univerzális lemezvizsgáló berendezésre szerelhető Naka-

1. táblázat. Hegesztési paraméterek HC340LA-HCT600X és HC340LA-HCT980X anyagpárosításokhoz

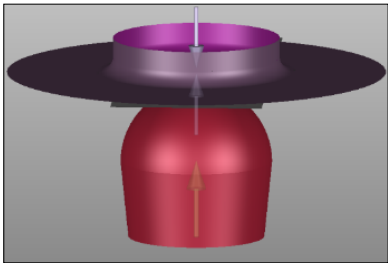
Párosítás	HC340LA-HCT600X	HC340LA-HCT980X
Hegesztési sebesség, V_h (m/min)	2,5	2,5
Folytonos teljesítmény, P (kW)	1,2	1,2
Fókuszpozíció (mm)	0	0
Fókuszolt terület, A (mm ²)	0,0394	0,0394
Hőteljesítmény, Q (J)	1200	1200
Teljesítménysűrűség, Q/A (W/cm ²)	$3,05 \cdot 10^6$	$3,05 \cdot 10^6$
Fajlagos hőbevitel, Q/v_{heg} (J/cm ²)	288	288



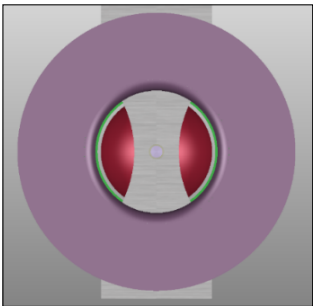
3. ábra. A húzógyűrű helyzete (kék vonal)

zima-teszt szerszámfelépítését vettük alapul. Az alakítószerszámok és a mintadarab elrendezését szimulációs környezetben az 1. és 2. ábra mutatja.

Az ábrázolásban a leszorítógyűrű nem látható, ugyanis ez nem mint geometria, hanem mint beállítási kényszer jelenik meg a szoftverben. A húzógyűrű átmérője 160 mm, vastagsága pedig 15 mm. A húzógyűrű helyzete a 3. ábrán látható.



1. ábra. Szerszámelrendezés AutoformR7 szoftverben (oldalnézet)



2. ábra. Szerszámelrendezés AutoformR7 szoftverben (felülnézet)

4.2. Bemeneti anyagparaméterek

A szimulációs környezetben végzett tesztek anyagra vonatkozó bemeneti paramétereit a felhasznált anyagok vizsgálatával határoztuk meg. Ezért az előzetesen legyártott mintadarabok anyagából szakítóvizsgálathoz lemez próbatesteket munkáltunk ki, melyeken szakítóvizsgálatot végeztünk, és ezek eredményeit bemeneti paraméterekké alakítottuk.

Az anyagok folyásgörbéjét a kombinált Swift-Hockett-Sherby-egyenlettel írtuk le [9]. A bemeneti értékeket a 2. táblázat foglalja össze.

A táblázatban szereplő paraméterek a következők: s lemezvastagság, m keményedési kitevő, C keménységi konstans, σ_i valódi feszültség, σ_{sat} telítési feszültség, a és p súlyozási paraméterek, σ_0 kezdeti folyáshatár, R_m pedig a szakítószilárdság.

2. táblázat. Folyásgörbe bemeneti adatok

		Anyag	HC 340LA	HCT 600X	HCT 980X
		s (mm)	1	1	1
Folyásgörbe paraméterek	Swift	ϵ_0	0,02	0,04	0,01
		m	0,22	0,16	0,098
		C (MPa)	578	1044	1578
	Hockett-Sherby	σ_i (MPa)	229	448	788
		σ_{sat} (MPa)	456	780	1160
		a	8,6	21	102
		p	0,81	0,812	0,785
		σ_0 (MPa)	235	443	798,4
		R_m (MPa)	343	668,9	1122

A lemezalakítási folyamatok megfelelő modellezéséhez szükség van továbbá a folyási feltétel meghatározására is. Az ezt leíró egyenletet ugyancsak szakítóvizsgálatból határoztuk meg úgy, hogy a próbatesteket a hengerlési irányra merőlegesen, azzal párhuzamosan és arra 45°-os szögben munkáltuk ki. Az alakítási határdiagram meghatározásánál pedig az F. Cayssials által megalkotott Arcelor V9 modell [10, 11] szerinti anyagparamétereket adtuk meg. A tanulmánynak nem célja, hogy a különböző anyagok alakítási határdiagramját felvegyük, kiszerkesszük. Hanem az, hogy azonos körülmények között vizsgáljuk, a különböző anyagpárosítások hogyan hatnak egymásra. Az említett adatokat a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat. Alakítási határdiagram bemeneti adatok

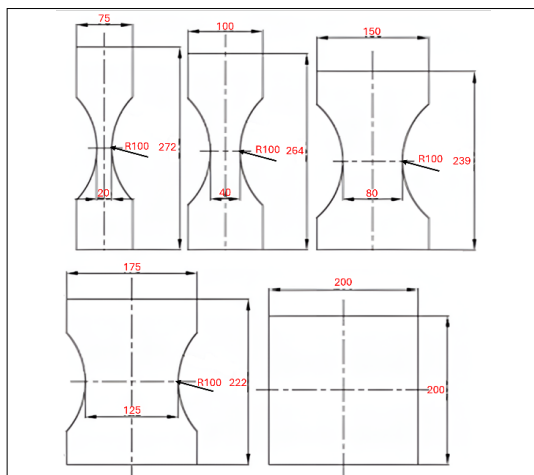
	Anyag	HC340LA	HCT600X	HCT980X
Barlat 89 modell [9]	r_0	1,82	0,865	0,73
	r_{45}	1,31	0,929	0,894
	r_{90}	2,38	0,941	0,828
	M	6	6	6
	r_m	1,71	0,916	0,837
Arcelor V9 modell	$A_{G,90}$ (%)	20,5	12,5	6,3
	$R_{m,90}$ (MPa)	325	669	1111

A táblázatban szereplő paraméterek a következők: r_0 képlékeny alakváltozási arány 0°-ban, r_{45} képlékeny alakváltozási arány 45°-ban, r_{90} képlékeny alakváltozási arány 90°-ban, M súlyozási paraméter, r_m átlagos képlékeny alakváltozási arány, $A_{G,90}$, $R_{m,90}$.

4.3. A szimulációban vizsgált próbadarabok

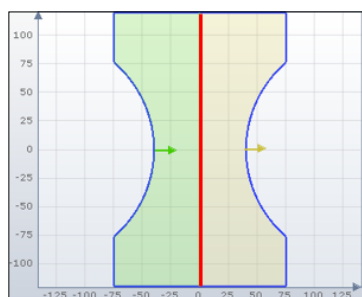
A próbadarabok geometriájának kiválasztásakor, a szerszámgeometriákkal összhangban, ugyancsak a Nakazima-vizsgálatnál használatos, különböző híd szélességekkel bíró, négyzet alakú próbatest-kialakításokat alkalmaztunk (20–200 mm). A próbatest-geometriák kiválasztásának háttérében az állt, hogy teljeskörűen lefedjük az alakítási határdiagram (FLD) lehetséges főalakváltozási tartományait. Az eltérő próbatest-kialakítások által létrehozott különböző feszültség-állapotok eredményeként a szakadási hely nem állandó; bizonyos mértékben változó helyeken lesz tapasztalható a tönkremenetel. A használt próbatest-geometriákat a 4. ábra szemlélteti.

Ahogy arról már korábban szó esett, a különböző anyagpárosítások kialakítása lézerhe-



4. ábra. A Nakazima-próbatestek méretezett műszaki rajza

gesztéssel történt. Azonban a valóságban és a szimulációs szoftverben is a hegesztési varrat irányultsága eltérő volt. A hegesztési varrat helyzete alapján két esetet különböztettünk meg, ezek pedig az „A” eset, amikor a hegesztési varrat (piros vonal) a hengerlési irányra merőleges (színes vonal), illetve a „B” eset, amikor a hegesztési varrat a hengerlési iránnyal párhuzamos. A két típust egy tetszőlegesen kiválasztott próbadarabon az 5. és 6. ábra szemlélteti.



5. ábra. „A” típusú hegesztésivarrat-elhelyezés



6. ábra. „B” típusú hegesztésivarrat-elhelyezés

5. A szimuláció eredményei

Az eredmények kiértékelése során az összehasonlítási alapot a különböző anyagpárosításokkal és hegesztésivarrat-orientációkkal rendelkező mintadarabok tönkremenetelig elért bélyegelmozdulás-értékek adták. Az **5–8. táblázatok**ban feltüntetett értékek tehát az anyagok tönkremenetelig történő alakítóbélyeg-elmozdulást szemléltetik.

5.1. Az „A” típusú mintadarabok

„A” típusú mintadarabok esetében a hegesztési varrat a hengerlési irányra merőleges.

Az eredmények kiértékelése során az alakítási folyamat addig tartott, amíg valamely alkotóanyag el nem érte a saját alakítási határdiagramját. A HC340LA-HCT600X anyagpárosításra a **4. táblázat**, míg a HC340LA-HCT980X anyagpárosítású próbadarabra nézve az eredményeket az **5. táblázat** foglalja össze. A táblázatokban a híd szélesség alatt a próbatestek legkisebb szélességi értékét értjük.

4. táblázat. HC340LA-HCT600X anyagpárosítás „A” típusú hegesztési varrattal

„A” típus HC340LA-HCT600X		
Hídszélesség (mm)	Bélyegelmozdulás HC340LA (mm)	Bélyegelmozdulás HCT600X (mm)
20	35,2	28,7
40	38,2	32,2
80	41,5	35,2
125	44,2	36,7
200	47,7	43,2

5. táblázat. HC340LA-HCT980X anyagpárosítás „A” típusú hegesztési varrattal

„A” típus HC340LA-HCT980X		
Hídszélesség (mm)	Bélyegelmozdulás HC340LA (mm)	Bélyegelmozdulás HCT980X (mm)
20	31,7	22,7
40	35,7	26,2
80	44,1	29,2
125	41,3	30,7
200	41,2	30,2

Ennél a varratelrendezésnél a 200-as hídszélességű próbatestet kivéve minden esetben a nagyobb szilárdságú és egyben kisebb alakíthatóságú anyag érte el először az (ezáltal lejjebb elhelyezkedő) alakítási határdiagramját. Tehát a

globális alakíthatóságot kizárólag a nagyobb szilárdságú anyag alakíthatósága határozta meg.

5.2. A „B” típusú mintadarabok

A „B” típusú mintadarabok esetében a hegesztési varrat a hengerlési irányval párhuzamos. Az eredmények kiértékelése során az alakítási folyamat addig tartott, amíg valamely anyag el nem érte az alakítási határdiagramját. Ezek eredményeit a **6–7. táblázat** foglalja össze.

6. táblázat. HC340LA-HCT600X anyagpárosítás „B” típusú hegesztési varrattal

„B” típus HC340LA-HCT600X		
Hídszélesség (mm)	Bélyegelmozdulás HC340LA (mm)	Bélyegelmozdulás HCT600X (mm)
20	31,2	–
40	34,7	–
80	31,7	–
125	30,2	–
200	34,7	38,2

7. táblázat. HC340LA-HCT980X anyagpárosítás „B” típusú hegesztési varrattal

„B” típus HC340LA-HCT980X		
Hídszélesség (mm)	Bélyegelmozdulás HC340LA (mm)	Bélyegelmozdulás HCT980X (mm)
20	31,2	–
40	33,7	–
80	31,2	–
125	32,7	–
200	30,2	32,2

Az eredmények szempontjából fontos még ismernünk, hogy „B” esetben egy HC340LA-HC340LA párosítás milyen értékű bélyegelmozdulást eredményez azonos körülmények között. Ennek eredményeit a **8. táblázat** szemlélteti.

8. táblázat. HC340LA-HC340LA anyagpárosítás „B” típusú hegesztési varrattal

„B” típus HC340LA-HC340LA		
Hídszélesség (mm)	Bélyegelmozdulás HC340LA (mm)	Bélyegelmozdulás HCT340LA (mm)
20	36,7	36,7
40	39,6	39,6
80	44,8	44,8
125	45,8	45,8
200	54,1	54,1

Ebből az látható, hogy a nagyobb szilárdságú terítékrésznek az alakváltozást akadályozó hatása erőteljesen megjelenik a kis szilárdságú oldalon, mely a „B” esetekben mindig a tönkremeneteli oldal. A globális alakváltozás a nagy hídszélességgel rendelkező próbatesteknél romlik erőteljesebben, amelynek magyarázata, hogy a háromtenge-lyű alakváltozási állapot ezeknél a próbatesteknél a sík alakváltozási állapotra redukálódik.

6. Következtetések

Cikkünkben a méretre szabott, hegesztett lemezek globális alakíthatóságát és az egyes terítékrészek egymásra hatását vizsgáltuk. A próbatestek fizikai tesztelése jelenleg is zajlik, itt elsősorban szimulációs eredményeket mutattunk be. Két esetet vizsgáltunk a hegesztésvarrat-orientáció szempontjából, két különböző, eltérő komponensekből összeállított próbadarab esetén, öt-öt különböző alakváltozási állapotban. A kapott eredmények alapján két megállapítást tehetünk:

- „A” esetben a mintadarabokat alkotó lemezek közösen deformálódtak, ebből kifolyólag annak az anyagnak a tönkremenetele következett be hamarabb, amelynek az alakítási határgörbéje lejjebb helyezkedik el (nagyobb szilárdságú), kivétel a 200×200 mm-es esetben;
- „B” esetben mindig a kisebb szilárdságú (HC340LA) anyag megy hamarabb tönkre, továbbá az is megállapítható, hogy a tönkremenetel értékét az eltérő szilárdságú anyagok (HCT600X-HCT980X) nem befolyásolják számottevően ebben a szilárdságtartományban.

A kutatás során további célunk olyan anyagpárosítások vizsgálata, ahol a HC340LA anyagot egyéb, kisebb-nagyobb mértékben eltérő szilárdságú anyaggal párosítjuk, annak érdekében, hogy megfigyeljük a szilárdságkülönbség hatását a globális alakváltozási képességre. Továbbá a meglévő mintadarabokon valós környezetben is elvégezzük a tesztek a szimulációs környezetben

ismertetett módszer alapján, és ezek eredményeit összehasonlítjuk a szimulációs eredményekkel.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kinsey B., Wu X. (szerk.): *Tailor welded blanks for advanced manufacturing*. Elsevier, Cambridge, 2011. 95–115.
- [2] Safdarian R.: *Forming limit diagram prediction of tailor welded blank by modified M-K model*. Mech. Res. Commun., 67. (2015) 47–57.
<https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2015.05.004>
- [3] Korouyeh R. S., Naeini H. M., Liaghat G. H., Kasaei M. M.: *Investigation of weld line movement in tailor welded blank forming*. In: Advanced Materials Research, Trans Tech Publications Ltd., 2012. 39–44.
<https://doi.org/10.4028/scientific5/AMR.445.39>
- [4] Safdarian R.: *The effects of strength ratio on the forming limit diagram of tailor-welded blanks*. Ironmaking Steelmaking, 45/1. (2018) 17–24.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1235371>
- [5] Merklein M., Johannes M., Lechner M., Kuppert A.: *A review on tailored blanks – Production, applications and evaluation*. Journal of Material Processing Technology, 214/2. (2014) 151–164.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.015>
- [6] Ahmetoglu M. A., Brouwres D., Shulkin L., Taupin L., Kinzel G. L., Altan T.: *Deep drawing of round cups from tailor-welded blanks*. Journal of Material Processing Technology, 53/3-4. (1995) 684–696.
[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01767-U](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01767-U)
- [7] Béres G. J., Danyi J., Végvári F., Tisza M.: *The present body in white materials*. Gradus, 2/2. (2015) 209–224.
- [8] Kovács Zs. F., Béres G., Weltsch Z.: *The Investigation of DC and DP steels weldability by laser beam*. Gradus, 4/2. (2017) 311–317.
- [9] Barlat F., Lian K.: *Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions*. International Journal of Plasticity, 5/1. (1989) 51–66.
[https://doi.org/10.1016/0749-6419\(89\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0749-6419(89)90019-3)
- [10] Cayssials F.: *Sheet Metal Forming Beyond 2000*. Proc. of the 20th Biennial [IDDRG] Congress, Brussels, Belgium (Liege: CRM), 1998. 443–54.
- [11] Cayssials F., Lemoine X.: *Proc. of the 24th IDDRG Congress*. Besancon, France, 2005. 1–8.